

Prof. dr hab. inż. Mariusz Malinowski
Politechnika Warszawska/ Wydział Elektryczny
Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej
Ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

Warszawa, 20.08.2025
SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEEITK

Wpłynęło dnia 25.08.2025

Zarejestrowano pod nr 510-1-7/25

Podpis [signature]

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY NAUKOWEJ DYSCYPLINY
AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA I TECHNOLOGIE KOSMICZNE,
AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ IM. STANISŁAWA STASZICA w KRAKOWIE

Tytuł rozprawy: **Wielopoziomowe przekształtniki DC-DC z tranzystorami z azotku galu GaN.**

Autor rozprawy: **mgr inż. Szymon Piotr Folmer**

1. Wstęp

Rozprawa doktorska przygotowana przez mgr. inż. Szymona Folmera poświęcona jest innowacyjnej topologii wielopoziomowego energoelektronicznego przekształtnika HVGDCC (ang. High Voltage Gain Direct Current Converter) wykonanego w dwóch technologiach tranzystorowych tj. CoolMOS i CoolGaN. Tematyka rozprawy doktorskiej inspirowana jest dynamicznym rozwojem układów DC-DC w zastosowaniu do ogniw fotowoltaicznych i elektrochemicznych magazynów energii. Pomimo tego, że przekształtniki prądu stałego wydają się być dosyć wnikliwie przebadane i opisane w literaturze, poszukuje się wciąż nowych rozwiązań pozwalających na uzyskanie dużych gęstości mocy, wysokiej sprawności energetycznej przy jednoczesnym wielokrotnym zwiększeniu napięcia wyjściowego oraz poprawy niezawodności. w tym wypadku praca doktorska dotyczy topologii przekształtnika z przełączanymi kondensatorami, która nie jest jeszcze wnikliwie przebadana i wykorzystana w zastosowaniach energoelektronicznych. W związku z tym wybór tematu rozprawy uważam za oryginalny i aktualny.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Celem rozprawy było opracowanie analitycznego modelu sprawności HVGDCC w dwóch technologiach CoolMOS oraz CoolGaN, stworzenie ich modeli symulacyjnych, budowa układów eksperymentalnych oraz porównanie obydwu technologii pracujących w trybach ZCS (ang. Zero Current Switching) oraz ZVS (ang. Zero Voltage Switching).

Licząca 267 stron rozprawa składa się z 6 rozdziałów, załączników przedstawiających projekty przekształtników oraz spisu literatury.

Rozdział 1 stanowi krótkie wprowadzenie przedstawiające tematykę pracy, bardzo ciekawy opis obecnego stanu wiedzy, cele badawcze, zawartość poszczególnych rozdziałów oraz rozbudowaną tezę brzmiącą *„Możliwe jest opracowanie i realizacja topologii przekształtnika DC-DC o wielopoziomowym wzmocnieniu napięcia w technice przełączanych kondensatorów pracujących z wysoką sprawnością, oscylacyjnym prądem przeładowania i w warunkach zerowego napięcia podczas załączenia części tranzystorów, a zastosowanie tranzystorów z azotku galu GaN umożliwia w porównaniu do przekształtnika zrealizowanego z wykorzystaniem tranzystorów krzemowych MOSFET, redukcję wartości prądów związanych z ładowaniem pojemności wyjściowych łączników”*.

Rozdział 2 skupia się już na rozważanym w pracy przekształtniku HVGDC, szczegółowo omawiając podstawową jego koncepcję działania, możliwość regulacji napięcia wyjściowego w szerokim zakresie oraz pracę przekształtnika w trybie ZCS oraz ZVS. Dodatkowo w podrozdziale 2.6 w sposób ogólny opisano straty mocy w przekształtniku HVGDC, co nie jest do końca potrzebne, ponieważ uwzględnia wiedzę dobrze opisaną w literaturze. Natomiast ciekawą częścią tego rozdziału jest analiza prądów płynących w układzie HVGDC (podrozdział 2.7), analityczny model sprawności (podrozdział 2.8) oraz dobór elementów (podrozdział 2.10).

W rozdziale 3 dokonano szczegółowego omówienia analitycznego modelu strat i sprawności przekształtnika HVGDC z podziałem na straty w tranzystorach (CoolMOS oraz CoolGaN), diodach, kondensatorach, dławikach oraz rezystancjach PCB jak również wykreślono analitycznie charakterystyki sprawności w trybie ZCS.

Rozdział 4 w swojej pierwszej części to przedstawienie i badania modelu symulacyjnego HVGDC w trybie pracy ZCS oraz ZVS wraz z prezentacją przebiegów napięć i prądów na elementach składowych przekształtnika. W drugiej części rozdziału dokonano symulacji strat występujących w przekształtniku w podziale na poszczególne komponenty przekształtnika oraz wykreślono charakterystyki sprawności HVGDC–CoolMOS oraz HVGDC–CoolGaN w dwóch trybach pracy tj. ZCS i ZVS, wykazując, co było przewidywalne, wyższą sprawność HVGDC–CoolGaN niż HVGDC–CoolMOS. Ciekawa jest natomiast duża różnica w sprawności obydwu technologii półprzewodnikowych szczególnie w obszarze małych mocy, sięgająca kilku procent. Kolejną obserwacją dokonaną przez Autora jest wyższa sprawność dla HVGDC–CoolGaN w trybie pracy ZCS o około 1%.

W rozdziale 5 przedstawiono wyniki eksperymentalne dwóch zbudowanych modeli laboratoryjnych w różnych trybach pracy. W pierwszej części tego rozdziału zawarto szereg przebiegów potwierdzających prawidłową pracę HVGDCC oraz przebiegi prądów i napięć na poszczególnych węzłach układu. Znacznie ciekawsza jest druga część rozdziału w której eksperymentalnie wykreślono i porównano charakterystyki sprawności HVGDCC–CoolMOS oraz HVGDCC–CoolGaN w dwóch trybach pracy tj. ZCS i ZVS dla układu eksperymentalnego. Ponadto zestawiono ze sobą wszystkie charakterystyki tj. modelu analitycznego, symulacyjnego i eksperymentalnego. O ile dla HVGDCC–CoolGaN charakterystyki są w miarę zbieżne, przynajmniej w środkowej części zakresu mocy, to już widać sporą rozbieżność dla mocy bliskich znamionowym. Rozbieżności są znacznie większe dla układu HVGDCC–CoolMOS, gdzie różnica pomiędzy eksperymentem a modelem analitycznym wynosi nawet kilka procent, a modelem eksperymentalnym i symulacyjnym o około 2%. Wyniki są znacznie bardziej zbieżne dla mocy bliskich znamionowym.

Rozprawę kończy rozdział 6 odnosząc się do zrealizowanych celów badawczych, przedstawia 8 wniosków badawczych, przedstawia kolejne kierunki badań oraz podsumowuje samodzielne osiągnięcia Autora rozprawy. Ponadto dołączono do rozprawy spis aż 15 publikacji mgr. inż. Szymona Folmera z czego 9 to publikacje w czasopismach o zasięgu międzynarodowym. Do rozprawy dołączono również schematy, widok projektów obwodów drukowanych, wizualizacje 3D oraz spis literatury obejmujący 118 pozycji.

Praca jest napisana bardzo starannie pod względem redakcyjnym i używa poprawnie polskiej terminologii naukowej i technicznej. Nielicznymi uwagami, które mogłyby ułatwić czytanie i analizę pracy są:

- W rozdziale 2 na rys. 2.1. pojawiają się symbole dla komponentów składowych przekształtnika HVGDCC, natomiast na dalszych rysunkach tj. 2.3, 2.5-2.13 już ich brakuje, co znacznie utrudnia czytanie i analizę tekstu;
- Rys. 3.1.-3.2, Rys. 4.17 pokazują starty w podziale na tranzystory, diody, kondensatory, dławiki i rezystancję PCB, jednocześnie opis jasno wskazuje, że straty w dławikach są pomijalnie małe, dlatego nie jest konieczne ich pokazywanie na rysunkach;
- Prezentacja wyników eksperymentalnych jako zrzutów ekranów z oscyloskopu nie jest czytelna. Trudno jest dostrzec linie siatki, opis kanałów oscyloskopu oraz skale V/dz, A/dz dla przedstawionych przebiegów. Znacznie czytelniejsze byłoby przedstawienie

wyników eksperymentalnych, jako pliku danych który jest eksportowany do innego programu, w którym można lepiej przygotować opisy poszczególnych przebiegów;

3. Uwagi ogólne

Zagadnienia związane z analizą teoretyczną, symulacyjną i eksperymentalną dotyczącą sprawności energetycznej układów z przełączanymi kondensatorami dla nowych technologii półprzewodnikowych z miękkim przełączaniem nie są łatwe i stanowią aktualnie przedmiot intensywnych badań prowadzonych zarówno w kraju jak i za granicą. Dlatego godnym podkreślenia jest także, że Autor opiniowanej rozprawy podjął się trudnej tematyki.

Do **uwag dyskusyjnych natury ogólnej**, jakie nasunęły się w czasie studiowania rozprawy należą:

1. Jako możliwe zastosowanie dla układu HVGDC do którego odnosi się Autor w rozprawie jest przedstawiona technologia mikroprzekształtników dla paneli fotowoltaicznych. Jednocześnie tego typu układy wymagają bardzo wysokiej sprawności energetycznej. HVGDC ma znacząco niższą sprawność niż układ przedstawiony np. w publikacji [83], a posiadający podobne cechy tj. regulację napięcia wyjściowego czy wielokrotne wzmocnienie napięciowe. Jak będzie wyglądało porównanie właściwości tych dwóch przekształtników DC-DC z przełączanymi kondensatorami dla podobnego przypadku pracy w którym uzyskujemy to samo wzmocnienie napięciowe?
2. Czy podjęto próbę weryfikacji danych pomiarowych sprawności energetycznej przy użyciu innych technik pomiarowych niż tylko analizator mocy HIOKI PW8001?
3. W świetle tego, że charakterystyki sprawności analityczna i eksperymentalna znacząco się od siebie różnią, szczególnie w dolnym przedziale mocy, proszę o wyjaśnienie w jaki sposób model analityczny i ewentualnie symulacyjny powinny zostać zmodyfikowane?

4. Ocena rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska ma charakter analityczno-symulacyjny oraz konstrukcyjno-eksperymentalny. Autor wykazał się bardzo dobrą znajomością energoelektroniki w aspekcie analizy, technik symulacji komputerowej, konstrukcyjnym oraz laboratoryjnym. Osiągnął sformułowany przez siebie cel, posługując się metodami

analitycznymi, symulacji komputerowej oraz badań eksperymentalnych. Praca w stosunku do stanu wiedzy z tej dziedziny wnosi szereg nowych sformułowań i wartościowych wyników stanowiących dorobek Autora.

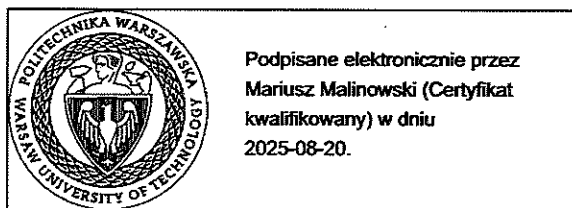
Za osiągnięcia własne Autora uznaje:

- wyprowadzenie zależności określających straty występujące w poszczególnych komponentach oraz opracowanie analitycznego modelu sprawności dla przekształtnika HVGDCC;
- opracowanie modelu symulacyjnego HVGDCC w różnych środowiskach symulacyjnych dla dwóch technologii CoolMOS oraz CoolGaN;
- projekt, wykonanie, uruchomienie oraz badania eksperymentalne przekształtników HVGDCC-CoolMOS oraz HVGDCC-CoolGaN;
- przeprowadzenie analizy porównawczej modeli analitycznych, symulacyjnych i eksperymentalnych dla HVGDCC-CoolMOS oraz HVGDCC-CoolGaN.

5. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa przedstawiona przez mgr. inż. Szymona Folmera pt. „**Wielopoziomowe przekształtniki DC-DC z tranzystorami z azotku galu GaN**”, stanowi samodzielny wkład Autora w obszarze energoelektroniki należącej do dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, a w szczególności przyczynia się do poszerzenia wiedzy związanej z analizą wielopoziomowych przekształtników DC-DC z przełączanymi kondensatorami.

Na tej podstawie stwierdzam, że **przedstawiona rozprawa doktorska odpowiada wszystkim warunkom określonym przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytułach naukowych i stawiam wniosek o jej dopuszczenie do publicznej obrony.**



Mariusz Malinowski

